第64卷 第6期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 6
2023年11月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Nov., 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.06.005

内日冕的绿线强度分布研究*

李子涵[1,2] 刘 煜[1,2,3†] 张雪飞[2‡] 梁红飞[1] 沙飞扬[2] 于 晋[4] 敦金平[5]

(1 云南师范大学物理与电子信息学院 昆明 650500)
(2 中国科学院云南天文台 昆明 650011)
(3 西南交通大学物理科学与技术学院 成都 611756)
(4 中国华云气象科技集团有限公司 北京 100081)
(5 中国气象局空间天气重点开放实验室/国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心);
许健民气象卫星创新中心 北京 100081)

摘要 日冕是太阳大气活动的关键区域, 是日地空间天气的源头. 受观测限制, 对日冕低层大气等离子体结构和磁场状态的研究非常欠缺, 国际上对于可见光波段日冕低层大气的亮度分层研究很少. 利用丽江日冕仪YOGIS (Yunnan Green-line Imaging System)的日冕绿线($\mathrm{Fe_{XIV}}$5303 Å)观测资料, 对内日冕区域($1.03R_\odot$–$1.25R_\odot$, $R_\odot$表示太阳半径)亮结构及其中冕环进行了有效的强度衰减分析. 对亮结构的强度在太阳径向高度上进行了指数衰减拟合, 比较这些拟合结果发现所得到的静态内冕环的衰减指数在一固定值附近. 然后将比较明显的冕环提取出来, 通过对不同高度的绿线强度进行指数拟合, 得出的衰减指数与亮结构中也比较相近, 这对进一步研究日冕中的各项物理参数演化提供了参考.

关键词 太阳: 日冕, 日冕仪: 观测, 日冕禁线: 日冕绿线
中图分类号: P182; **文献标识码**: A

1 引言

日冕是太阳大气的最外层, 由高度电离低密度的热等离子体构成, 温度能够达到百万度, 是大规模太阳活动和灾难性空间天气的起源, 它包含了极其丰富的信息和各种物理过程. 早在2000多年前, 中国古代已经有了日食的观测记录, 1851年首次在日食时成功进行了日冕照相[1].

法国科学家里奥(Bernard.Lyot)于1931年发明了日冕仪, 并首次成功地在无日食条件下观测到了日冕[2]. 日冕仪能够直接探测到日冕信号的一个前提是, 观测地点的天空背景亮度必须尽可能低. 为了最大限度地消除散射光, 一般在海拔3000 m左右的高山上进行日冕仪的观测, 当天气晴朗时, 太阳附近的天空亮度可低达日面亮度的10^{-5}量级, 可通过日冕仪观测到内冕[1].

日冕绿线(5303 Å)最早是在日食期间观测中发现的[3], 里奥发明日冕仪之后该线被广泛用于日冕的常规观测. 5303 Å属于$\mathrm{Fe_{XIV}}$基态的磁偶极子跃

2022-09-20收到原稿, 2022-12-26收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12373063、12173086)、联合基金项目(U1931116)资助, 国家科技基础条件平台-国家空间科学数据中心(http://www.nssdc.ac.cn)提供数据资源

†lyu@ynao.ac.cn

‡zhangxuefei@ynao.ac.cn

迁, 由Fe_{XIV}离子P轨道磁量子数3/2到1/2 (光谱项$^2P_{3/2}$–$^2P_{1/2}$)跃迁产生[4], 它的形成温度约为1.8×10^6 K, 是日冕中最强的可见光波段发射线, 也是日全食期间被人们广泛使用的一条谱线. 正是通过长期积累的地面5303 Å观测资料, 国际上为研究日冕长周期活动专门定义了日冕指数这一重要指标(Coronal Index, CI)[5–6].

磁场是控制太阳活动的重要物理量, 太阳耀斑、日冕波等日冕活动都与磁场有关[7–9]. 太阳大气中的等离子体主要分布于磁结构中, 在极紫外(Extremely ultraviolet)波段或X射线波段观察到了太阳大气中充满了明亮的环状结构[10–11]. 由于这些环比周围的等离子体要亮得多, 这意味着其内部压力和密度的相对增强. 日冕中的环状结构也被称为冕环, 广泛分布在太阳宁静区和活动区中[12], 形态与磁结构类似[13–15], 可以很好地反映磁结构, 也是光球与日冕之间的能量通道. 不同的日冕发射线, 比如日冕红线和绿线, 可以显示不同的日冕磁场的局部结构[16]. 对于日冕绿线Fe_{XIV}, 1997年Wang等人利用SOHO (Solar and Heliospheric Observatory)飞船上搭载的LASCO (Large-Angle Spectroscopic Coronagraph)-C1日冕仪观测资料研究发现大尺度日冕温度、强度分布与底层光球(冕环足点处)磁场结构和强度密切相关[17], 表明日冕绿线和日冕磁场具有一定程度的相关性, 并且相关系数随着日冕高度递减(从$1.5R_\odot$到$1.15R_\odot$, $R_\odot$为太阳半径)有明显变大的趋势, 但受C1观测视场影响, 最小高度限制在$1.1R_\odot$. 借助丽江地面日冕仪观测的优势(其日冕观测的最低高度可达$1.03R_\odot$), Zhang等人在最近的统计研究中也发现在$1.1R_\odot$以上范围内, 不同纬度冕环强度与磁场的相关系数较高[18], 并首次明确指出相关系数最大值应该发生在$1.1R_\odot$高度处附近. Zhang等人[18]同时也指出在冕环顶部具有更高的相关系数, 磁场对高温日冕辐射的主导作用在闭合冕环中占比更大, 暗示了基于日冕绿线数据对未来定量研究磁场和日冕强度更具有参考. 重要的是该研究[18]表明冕环足点亮度与磁场强度弱的相关性反映了足点附近的日冕加热机制与环顶部不同, 这一发现意味着电流耗散(dissipation of currents), 阿尔芬波和磁声波耗散(dissipation of Alfven and magnetosonic waves)加热机制或许在整个冕环系统中同时存在, 但电流耗散加热机制在冕环顶部附近占比更大, 其研究结果[18]有望为进一步估算与日冕加热相关的定标定律和验证日冕磁场的理论模型提供观测证据. 利用日冕绿线观测和其他波长数据, 可以推导出等离子体密度、温度、速度、磁场等参数, 并将其用于日冕研究[7–8, 19]. 近年来, 通过Fe_{XII}1075 nm等一些近红外日冕禁发射线直接进行日冕磁场测量也已经成为可能[20–21]. 此外在长周期研究中日冕绿线强度随时间和纬度的分布存在一些周期性变化[22], 日冕绿线亮度与磁场强度的相关系数随纬度的变化也呈现出明显的周期性[23–24]. 对于日冕绿线, 它除了能揭示长期日冕周期及其与其他太阳活动的关系外, 利用其对太阳活动的高分辨率观测也有助于理解日冕加热和太阳风加速等问题[25], 包括探测太阳边缘日冕波动和日冕物质抛射[26].

日冕辐射强度相对于光球辐射非常弱, 并随高度急剧下降. 在日面边缘相同高度处, 局部日冕绿线的亮度在太阳活动区域周围会显著增强, 并在黑子附近达到最大值[27]. 我们在一些活动区附近通常可以看到形态复杂的日冕亮结构, 这也反映了活动区上方的日冕磁场结构的复杂性.

自LASCO-C1仪器因低温失效后不再开展空间日冕绿线观测, 因此日冕绿线的数据主要来自地面日冕仪[28]. Zhang等人基于丽江日冕绿线和SDO (Solar Dynamics Observatory)/AIA (Atmospheric Imaging Assembly)多波段的日冕数据进行分析, 研究结果首次发现5303 Å和211 Å相比SDO/AIA的其他波段具有更高的相关性[29]. 对于精确跟踪5303 Å观测到的发生在日面边缘上方的明亮日冕环或者其他日冕结构, 结合211 Å的观测可能将日冕中不同高度的物理过程联系起来开展分析研究. 同时, 地面日冕仪观测因受到昼夜交替、局地天气条件等因素的影响, 容易造成观测数据的不连续性和分析结果的误差, 而AIA 211 Å的观测以及

其他EUV波段的空间连续资料, 或许有助于填补地基日冕绿线数据“缺失”的观测空白.

因此, 保持长期的绿线观测是非常重要的. 通过国际上多个地面日冕观测站的长期通力合作, 目前已获得连续数个太阳活动周期的标准日冕绿线资料. 这些宝贵资料被用来分析研究日冕的长周期活动规律[30–32], 弥补了后期空间日冕仪观测资料经常间断的不足. 当前, 日冕绿线的地面观测站点主要有: 斯洛伐克的卢穆尼克峰[33]、俄罗斯的基斯洛沃茨克[34]和中国丽江[26]. 中国丽江日冕仪观测站于2013年与日本国立天文台乘鞍(Norikura)站合作建成运行至今[18]. 虽然绿线$\mathrm{Fe_{XIV}}$5303 Å长期用来作为日冕监测的工具, 但对绿线观测的信息还远未被完全挖掘. 在本文中, 我们通过丽江10 cm日冕仪的绿线观测资料, 筛选出了一些2020年以来的观测资料, 对日冕绿线强度的衰减进行拟合分析. 在第2节中, 我们介绍了绿线观测和数据处理方法. 在第3节中, 我们对处理后的日冕亮结构及冕环进行拟合. 在第4节中, 给出了结果和讨论. 最后, 第5节是结论部分.

2 日冕绿线观测和数据处理

2013年, 中国科学院国家天文台、云南天文台与日本国立天文台合作, 将乘鞍站10 cm口径Lyot日冕仪进行升级改造后运送安装在丽江高美古观测站. 丽江高美古为低纬度高海拔地区, 天空散射光低, 大气观测条件良好[35–36]. 统计结果显示, 当天空晴朗时, 丽江站整层大气光学波段的平均天空背景亮度低于20 ppm, 适合于日冕仪观测条件.

目前, 10 cm Lyot日冕仪在丽江已经良好运行观测近10 yr, Lyot日冕仪重100 kg, 总长度近3 m, 在5303 Å的主镜焦距为1490 mm, 其配备赤道跟踪装置和高精度窄带里奥滤光器(以5303 Å为中心的1 Å半峰带宽)和CCD相机(Charge Coupled Device, 1024×1024像素), 其突出优点是能够观测日冕低至$0.03R_{\odot}$高度处的结构[37]. 终端成像系统YOGIS (Yunnan Observatories Green-line Imaging System)为日冕数据提供了$64' \times 64'$视场(x、y方向约$2R_{\odot}$), 适用于按时间序列观测日冕内部结构, 通过CCD相机来记录日冕图像, 该系统可以获得单峰、双峰、±0.45 Å模式的图像, 然后重复8次以提高信噪比[38]. 丽江日冕仪YOGIS系统工作在日冕绿线观测低层日冕大气的形态和多普勒速度场, 时间分辨率能够达到1 s量级. 丽江日冕仪不仅是目前国内唯一能够对低层日冕绿线进行高精度成像和多普勒速度场采集的日冕仪, 并且它迄今保持着世界上最长的日冕绿线观测记录[39].

首先我们对原始数据进行预处理, 去除了天空背景连续谱散射光, 并用相应的暗场和平场进行了校正. 图1是2021年10月30日拍摄的日冕绿线完整图像, 日冕距太阳边缘最小高度$0.03R_{\odot}$, 图像分辨率为$2.67''$/pixel, 在x轴方向为$1.5R_{\odot}$, 在y轴方向为$1.3R_{\odot}$. 在图1左图中我们可以比较明显地看出图中白色方框中圈出的区域存在复杂的亮结构, 结合SDO观测其对应的太阳活动区为AR12886, 磁场单极占主导, 磁场位型为α/α (磁场位型单极占主导通常伴随着相反极性谱斑的是α型). 因为我们的目的是对日冕绿线强度衰减进行分析, 所以我们主要选取了日冕中比较明显的部分, 也就是图像中白色方框圈出绿线强度较强位置处的亮结构. 我们截取了白色方框中的部分如右图所示, 可以看出其中存在冕环结构.

随后我们对图1中完整日冕图像采用圆霍夫变换确定了其掩体的中心坐标和半径, 使用确定的掩体中心坐标来对图像沿掩体边缘左侧按逆时针方向360°进行极坐标展开, 展开的径向高度为$1.25R_{\odot}$, 如图2所示, x轴为位置角(0°–360°), y轴为距掩体的像素高度. 我们在图2中对每个位置角的径向强度进行了提取, 按照其强度确定了对应亮结构的范围, 在图中为两条白线中间的范围177°–188°. 我们筛选了一些2020年以来其他日期的观测质量较好、亮结构较清晰的观测资料, 用上述同样的方法对原始数据进行处理, 得到了全部日期的日冕绿线亮结构范围内的强度值.

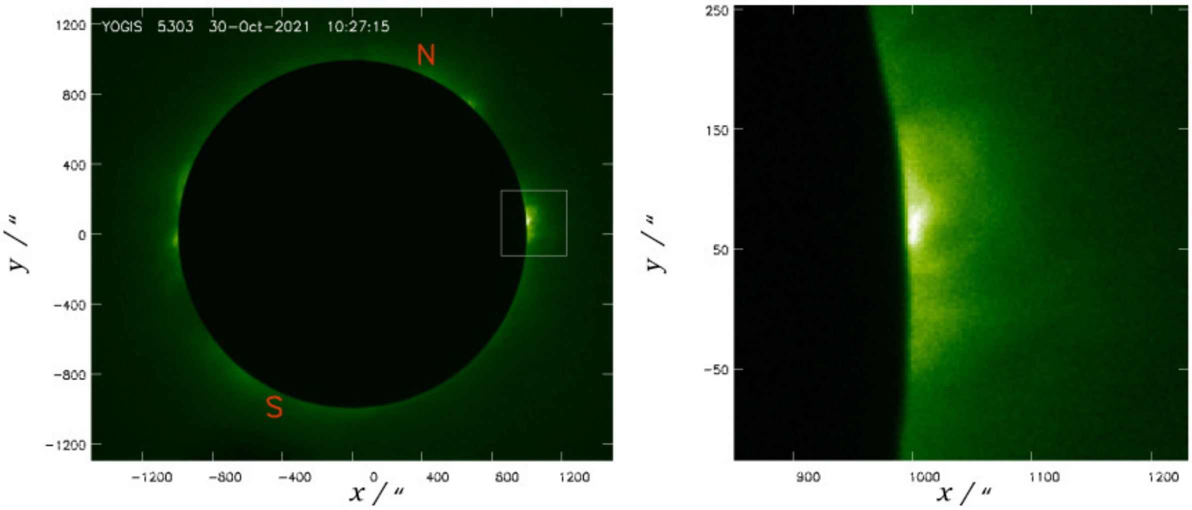


图 1 左图为丽江日冕仪2021年10月30日10:27:15拍摄的太阳日冕绿线完整图像, 在x轴方向为1.5$R_\odot$, 在y轴方向为1.3$R_\odot$, 红色S/N表示太阳南北极方向, 白色方框是我们所感兴趣的日冕亮结构, 右图为左图方框内的亮结构放大图.

Fig. 1 The left picture shows the complete image of the green line of the solar corona taken by the Lijiang coronagraph at 10:27:15 on October 30, 2021, which is at 1.5$R_\odot$ in the x-axis direction and 1.3$R_\odot$ in the y-axis direction. The red S/N indicates the sun's north and south poles, the white box is the coronal bright structure we are interested in, and the right picture is the enlarged image of the bright structure in the left picture.

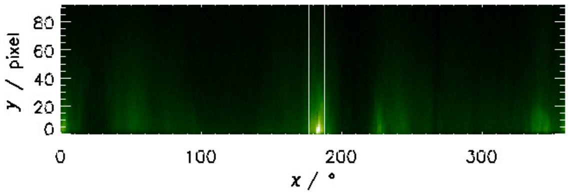


图 2 图1左图完整日冕绿线图像沿掩体边缘左侧在1.25$R_\odot$范围内极坐标展开, 两条白线之间是我们所确定的亮结构范围177°–188°.

Fig. 2 The left image of the coronal green line of Figure 1 is expanded in polar coordinates in the range of 1.25$R_\odot$ along the left side of the cover edge. Between the two white lines is the range of the bright structure we determined from 177° to 188°.

如图3所示, 我们还在2021年11月3日和2021年10月30日的日冕绿线观测资料中找到了比较清晰的冕环. 我们手动将冕环轮廓圈定出来, 通过区域生长法确定出冕环结构, 并将确定的冕环全部位置坐标信息提取出来, 我们用红色虚线在图中标出了冕环的结构. 然后与之前一样, 按照圆霍夫变换对全日面图像识别出掩体中心坐标和掩体半径, 在掩体半径1.01倍处, 以掩体半径的0.005倍为步长向外取同心圆, 每个同心圆的宽度我们设置为2 pixel (每个半径±1 pixel), 在图中我们用黄色实线标记了不同高度同心圆的部分圆弧, 白色实线标定了环顶附近的位置. 通过取不同高度的同心圆与冕环相交部分, 我们就可以得到每个高度上的冕环强度值.

3 日冕亮结构及冕环的强度拟合

首先我们对图2中在亮结构范围内(位置角177°–188°)的每个y轴像素点高度的强度取平均值, 将它作为亮结构在特定高度上的强度值, 这样我们得到了每个像素点高度上的日冕绿线亮结构强度值. 然后我们选出了2020年以来质量较好的部分绿线资料如表1所示, 表中显示了日冕绿线资料的观测日期、时间(世界时UT)、位置角范围、活动区及磁场位型. 其中具有相反极性的一对双极黑子是β型, 具有不规则极性的复杂黑子群是γ型, 双极黑子群称为$\beta\gamma$型. 使用与上述同样方法对这些资料进行处理, 得到了每个日期的亮结构的强度. 对于图3中的冕环, 我们先得到不同高度的同心圆与冕环相交部分的强度值, 然后对每个高度上的强度值取平均作为冕环在特定高度上的强度.

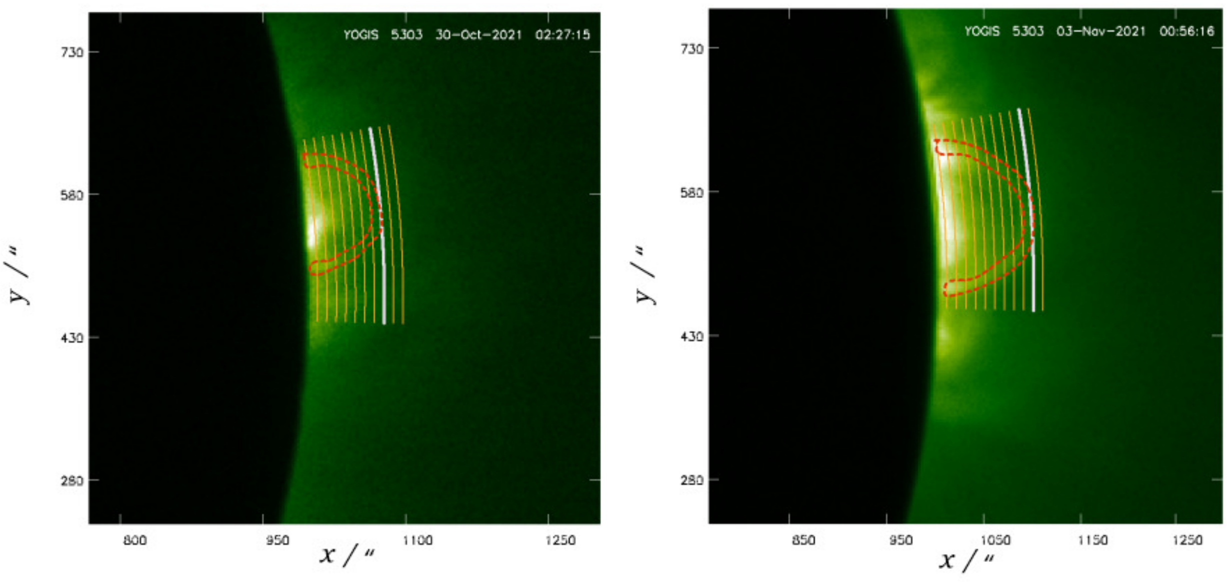


图 3　2021年11月3日和2021年10月30日日冕绿线局部观测资料, 红色虚线圈定了冕环的范围, 黄色实线为不同高度的圆弧, 白色实线标定了环顶附近的位置.

Fig. 3　Local observation data of the coronal green line on November 3, 2021 and October 30, 2021. The red dashed line delineates the scope of the coronal loop, the yellow solid line is the arc of different heights, and the white solid line demarcates the position of the top of the loop.

表 1　选择日冕绿线资料的观测日期、时间、位置角范围、活动区及磁场位型

Table 1　The observation date, time, range of position angle, active area and magnetic field configuration of the selected coronal green line data

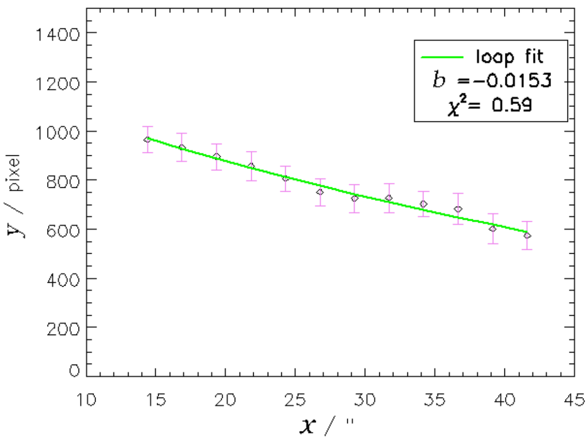
Number	Date	Time(UT)	Position Angle	Active Region	Hale Class
01	2020–11–16	04:05:14	2°–5°	AR12781	α /α
02	2020–11–30	02:15:29	217°–229°	AR12790	β/β
03	2020–12–07	02:58:42	345°–359°	AR12785	α/α
04	2021–10–23	02:02:29	224°–232°	AR12888	α/-
05	2021–10–24	01:08:43	219°–232°	AR12888	α/α
06	2021–10–30	02:27:15	177°–188°	AR12886	α/α
07	2021–11–01	01:48:28	1°–9°	AR12890	/
08	2021–11–03	00:56:16	176°–190°	AR12887	$\beta\gamma/\beta$
09	2021–12–26	06:12:10	189°–207°	AR12907	$\beta\gamma/\beta\gamma$
10	2022–01–01	05:07:13	122°–167°	AR12920	β/β
11	2022–01–09	02:49:54	331°–348°	AR12927	α/-
12	2022–01–26	09:04:48	26°–60°	AR12938	β/β

通过分析掩体边缘$1.03R_\odot$到$1.25R_\odot$范围内的日冕绿线强度值发现, 强度有时会呈现先增强后下降的趋势. 这是因为掩体边缘衍射造成临近日面边缘处的杂散光强度显著增加, 因此我们均从强度最大值高度开始取值. 我们通过上述方法得到不同结构的强度分布, 使用指数函数$F(h) = a\mathrm{e}^{bh} + c$来对日冕绿线亮结构和冕环强度在太阳径向高度上进行拟合, 式中h为距太阳边缘高度(单位: 角秒), a、b、c为我们的待定参数, 这里我们重点关注指数b的值. 为了确定衰减指数我们这里采用指数函数形式拟合, 其形式也借鉴于日冕指数的形式[6], 日冕指数(CI)是对日冕绿线的地面观测得出的, 用于标定太阳在日冕绿线5303 Å波段的辐照度. 日冕指数兼顾了内日冕(小于$1.25R_\odot$)高指数衰减和较高日冕低指数衰减的不同分布特征. 本文中, 我们仅对丽江数据的内日冕构建衰减指数模型, 期待由单一衰减指数值就能够大致确定强度的衰减规律, 所以我们针对丽江地面日冕仪对内日冕的观测资料采用单指数函数形式进行拟合.

4 拟合结果与讨论

通过指数函数形式$F(h) = a \times \mathrm{e}^{b \times h} + c$, 对日冕绿线亮结构和冕环强度在太阳径向高度上的拟合, 我们得到的结果如图4、图5所示. 图4为图3中日冕绿线图像冕环强度沿掩体边缘径向方向的拟合结果, 图5为通过极坐标展开方法对亮结构强度进行指数拟合的结果. 我们对每个高度上的强度取标准差作为误差, 在拟合过程图4、图5中以误差棒的形式标注出. 根据卡方检验(Chi-square test), 确定自由度和显著性水平参数$P = 0.05$, 来对我们的拟合结果进行拟合优度的检验.

在图4中绿色的曲线为上述图3中两冕环强度通过指数函数拟合的曲线, 用loop fit表示, 这两天比较清晰的冕环, 其环顶高度位置分别为$1.11R_\odot$和$1.13R_\odot$, 我们得到了拟合指数b, 结果分别为: -0.0153、-0.0156, 得到的两个指数值差别很小. χ^2值分别为0.59、0.65, 相应在卡方检验中P值均在0.995以上. 我们取标准差作为误差, 拟合的指数b误差分别为23%、9%.



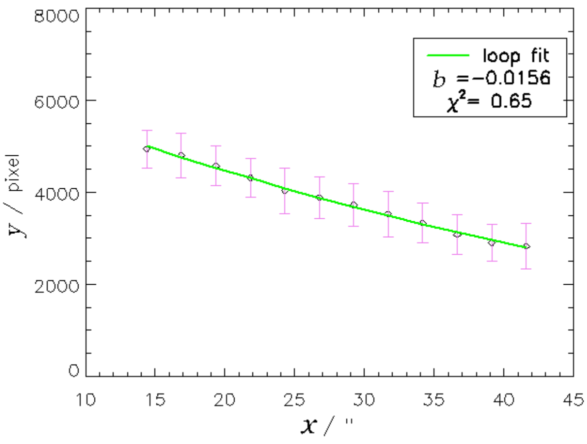


图 4 图3中两个日冕绿线图像冕环强度沿掩体边缘径向方向的拟合结果, 绿色的曲线为指数函数的拟合, 用loop fit表示, 拟合指数b和χ^2在图例中标出.

Fig. 4 The best fit results of the coronal ring intensity along the radial direction of the cover edge of the two coronal green line images in Figure 3. The green curve is the fitting of the exponential function, represented by loop fit, and the fitting index b and χ^2 are marked in the legend.

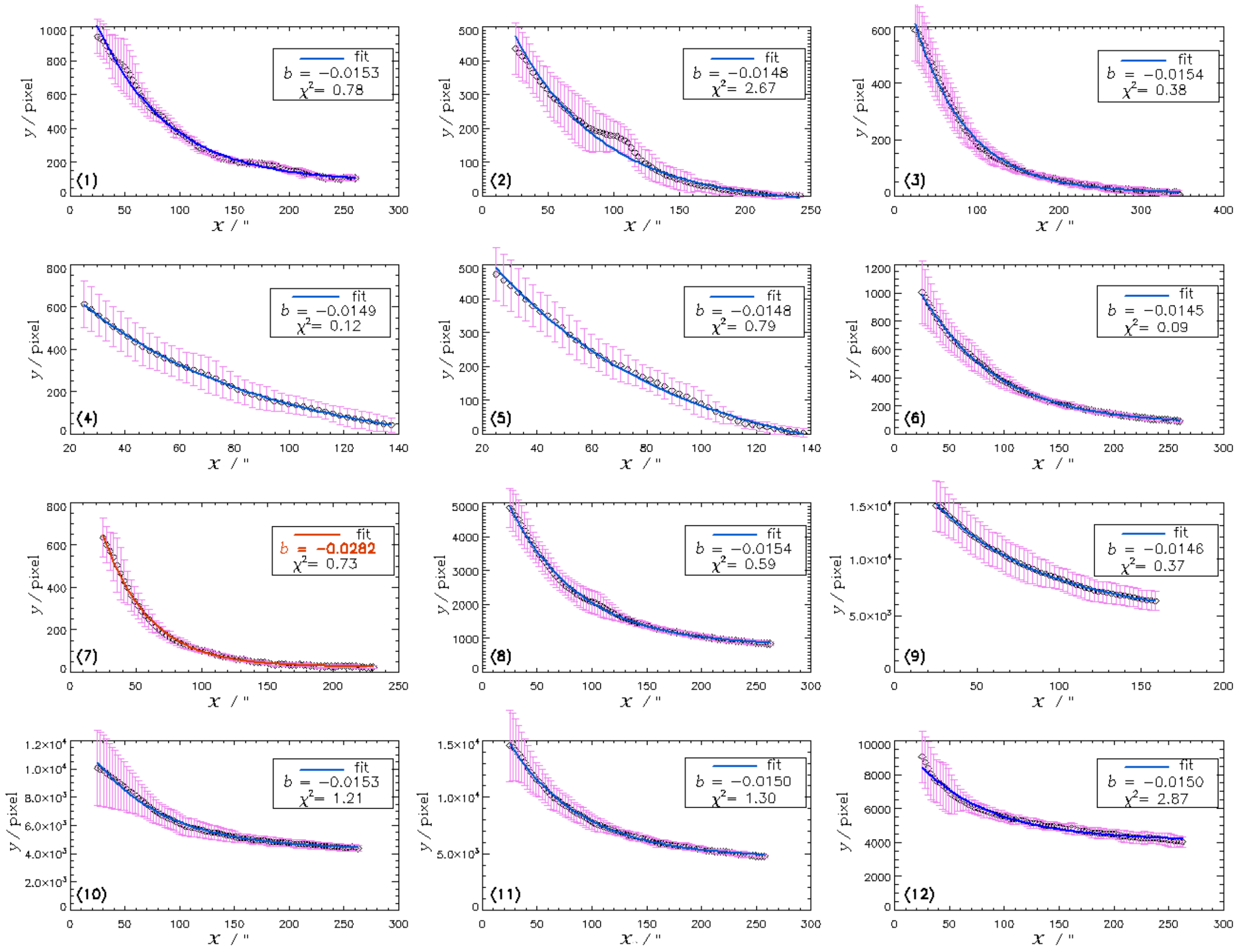


图 5 对选出的资料通过极坐标展开方法对亮结构强度进行指数拟合的结果, 指数拟合为蓝色的曲线用fit表示, 拟合指数b和χ^2在图例中标出.

Fig. 5 Results of exponential fitting of the intensity of bright structure by means of polar coordinate expansion for selected data. The blue curve of exponential fitting is represented by fit, and the fitting b and χ^2 are marked in the legend.

在图5中对表1内所有日期资料的拟合用fit表示, 由误差棒的分布可以看出, 在亮结构较低高度处的误差较大, 随高度上升误差逐渐减小, 而图4中提取冕环强度的误差值较为均匀. 我们得到的b值分别为: −0.0153、−0.0148、−0.0154、−0.0149、−0.0148、−0.0145、−0.0282、−0.0154、−0.0146、−0.0153、−0.015、−0.015. 拟合得到的b值均在−0.015附近(图中蓝色曲线所示), 除去−0.0282的值(在图5的图(7)中用红色曲线标出), 其他值偏差均在−0.001以内, 最大偏差6.7%. 我们对拟合的日冕资料进行分析发现, 日冕亮结构分布比较均匀, 有些能够看出亮结构整体被环状结构包围的轮廓. 而拟合结果为−0.0282的资料中整体亮结构范围较小, 距离太阳边缘较近, 且类似于小的冕环结构位于亮结构整体的边缘, 并未能与底部发亮部分构成亮结构整体, 相对掩体边缘较亮的部分衰减明显更慢. 另一方面, 我们对这一时刻前后连续时间的观测资料对比发现亮结构整体形态变化较大, 其实际并非处于静态, 而是处于亮结构的动态消散过程中. 所以对其整体积分来拟合的结果与其他值偏差较大, 本文亦就不考虑它为典型的静态稳定的绿线冕环样本. 对排除后的拟合结果进行卡方检验χ^2值分别为0.78、2.64、0.38、0.12、0.79、0.09、0.59、0.37、1.21、1.30、2.87. 相应在卡方检验中P值均

在0.995以上. 取标准差作为误差, 拟合的指数b误差范围在1%–6.4%, 相比于图4中拟合指数误差较小, 考虑到由于冕环较低, 对冕环强度的选取数据点较少, 可能会导致拟合产生的误差较大.

为了对比冕环与亮结构这两种拟合结果的区别, 我们将上述两个冕环及其所对应亮结构的拟合放在了一起, 如图6所示. 在图6中, 绿色曲线为对冕环的拟合, 蓝色曲线为对冕环所对应亮结构部分的拟合. 由于对亮结构的拟合在靠近太阳边缘距离较近处, 掩体边缘杂散光的影响较大, 使强度存在增强的趋势. 我们根据图像考虑是由于冕环两足点处的中间位置强度过大导致, 亮结构会存在这种现象, 但对冕环结构并不存在明显的影响. 所以我们去除了亮结构强度上升的点, 亮结构比冕环的初始位置更高一些.

在同一太阳高度上, 我们发现亮结构的数值强度均比冕环的强度更大, 我们分析也是由于大部分亮结构冕环两足点的中间位置强度对亮结构贡献较大, 所以在同一高度积分后的亮结构强度明显大于所对应的冕环结构强度. 我们的拟合结果分别为: -0.0153和-0.0145、-0.0156和-0.0154, 冕环的衰减指数b的值均小于所对应的亮结构的指数b值. 同理在我们提到的冕环在亮结构的边缘位置, 亮结构的主要强度来自冕环包围的底部, 所以冕环相比于整个亮结构来说衰减更快, 自然得到的指数b的值更小. 虽然我们对两个日冕绿线冕环拟合得到的指数值差别不大, 但由于考虑到两个日冕资料日期较为相近, 所以可能并不能代表冕环的具体衰减情况. 但通过确定出冕环结构来拟合出衰减指数与通过图像极坐标展开纵向切片拟合得出的指数的整体差别不大, 均在-0.015左右. 对于亮结构中其他不清晰的冕环我们试着去识别并圈定冕环或是太阳边缘发散的环状结构, 但是拟合出的指数较小, 与文中拟合出-0.015的值相差近一个数量级. 我们考虑是由于不清晰的冕环自身强度较低, 距离太阳表面距离较近, 与很多其他的亮结构混在一起, 加上背景场的影响再合并积分效应, 可能会对其强度影响较大.

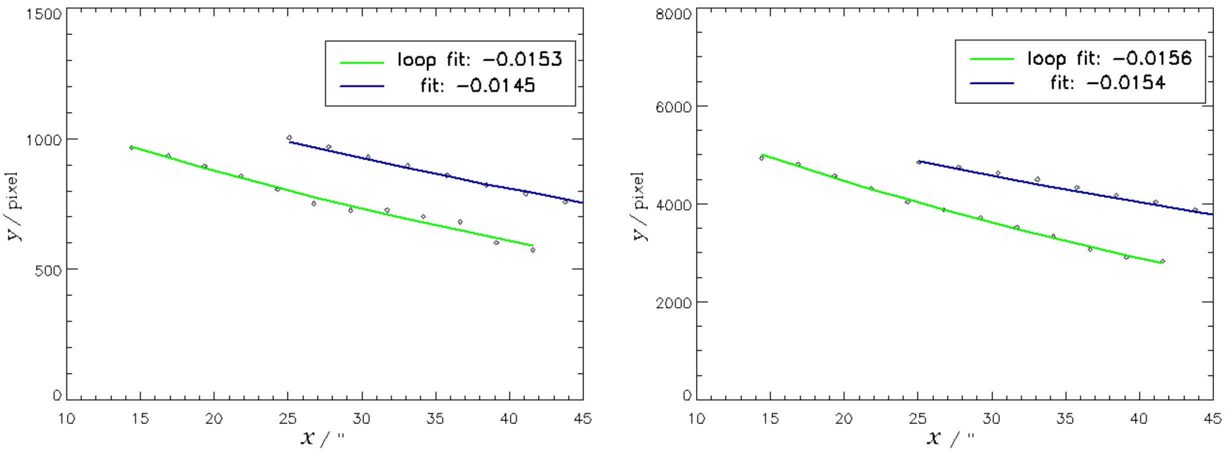


图 6 对两个日冕绿线冕环资料拟合及其对应的亮结构拟合, 绿色曲线为对冕环的拟合, 蓝色曲线为对冕环所对应亮结构部分的拟合.

Fig. 6 The fitting of coronal rings with two coronal green lines and their corresponding bright structures. The green curve is the fitting of coronal rings, and the blue curve is the fitting of the corresponding bright structures of coronal loop.

在本文中, 我们利用丽江10 cm日冕仪观测资料, 分析了日冕绿线Fe_{XIV} (5303 Å)强度的衰减, 通过图像极坐标展开及选取冕环来对日冕结构内不同强度的部分进行指数衰减拟合, 比较了两种不同方法提取的强度分布. 结果表明, 不同日冕结构随高度衰减拟合所得到的指数结果均在一固定值附近, 且通过卡方检验证明我们的拟合优度在较高水平. 我们将本文得到的结果与1973年Rušin的拟合[40]比较分析, Rušin的文中说明日冕亮度按高度衰减可以用多个(假定数目是n)衰减指数形式之和来表达, 而$n = 2$就可以反映不同时间段、不同方位角日冕结构的衰减情况. 而针对不同情况都有不同的系数和衰减指数. 我们的结果也符合Rušin的指数函数表示, 转换单位后的指数值在−0.9附近, 符合Rušin文中拟合指数值的范围, 并且针对丽江日冕仪绿线数据观测情况我们可以仅用一个衰减函数来表示.

此外我们选取的冕环环顶位置在$1.1R_{\odot}$附近, 拟合结果表明亮结构整体强度在相同范围内随高度的变化呈现相同的趋势. 在更高的范围, 亮结构的强度衰减更偏向线性衰减, 低日冕以闭合磁场为主导, 高日冕以开放磁场为主导, 可见活动区与宁静区日冕加热机制不同, 在冕环中闭环加热时, 直流(电流耗散)和交流(阿尔芬和电磁波耗散)机制同时作用于整个闭环系统[18]. 1997年Wang等人利用空间太阳望远镜SOHO LASCO/C1日冕仪绿线资料发现[17], 冕环足点($1.15R_{\odot}$)附近等离子体密度与磁场强度密切相关, 所计算出的日冕形态结构与观测非常相似. 我们利用丽江绿线数据发现在$1.1R_{\odot}$附近处, 低冕环环顶处的亮度与日冕外推磁场强度统计相关性最好, 并且发现在这一高度范围不同日冕结构的亮度与外推磁场强度均能较好吻合, 丽江地面日冕仪的优势是可以对更靠近太阳边缘的日冕结构进行深入研究. 综上所述, 我们认为通过指数函数拟合的指数b在-0.015 ± 0.001范围内比较符合本文大部分日冕绿线强度资料的. 最后, 日冕绿线的地面观测通常受到昼夜交替、当地天气条件等复杂因素的限制, 容易导致观测的不连续和数据分析不精确, 并且由于丽江日冕仪的孔径小, 所以本文得出的一些结论可能并不完备, 未来需要更高分辨率的日冕观测数据进一步证实和改进.

5 结论

日冕作为太阳大气的最外层, 是太阳大气活动的关键区域, 也是地球物理和空间现象的重要辐射源. 日冕研究在科学应用领域具有特殊的重要性以及诸多尚未解决的问题, 特别是由于观测限制, 人们对日冕低层大气等离子体结构和磁场状态的研究非常欠缺, 国际上对于可见光波段日冕低层大气亮度的研究很少. 在本文中, 我们利用丽江日冕仪YOGIS的日冕绿线(Fe_{XIV}5303 Å)观测资料, 对内日冕区域($1.03R_{\odot}$–$1.25R_{\odot}$)亮结构及其中静态内冕环首次进行了专门的强度衰减分析, 我们通过对太阳盘极坐标展开确定亮结构范围和圈定冕环的方式来提取出不同高度日冕绿线强度. 对亮结构及其冕环的强度在太阳径向高度上进行了指数衰减拟合, 通过比较这些拟合结果发现所得到的衰减指数均在一固定值(−0.015)附近, 与历史上Rušin[40]基于光谱扫描测光的标准统计拟合结果吻合. 我们拟合的冕环高度在$1.1R_{\odot}$与其对应亮结构拟合结果相近, 最近的冕绿线研究中, 借助日冕绿线的高亮度和绿线对光球层磁场的高灵敏度, Zhang等[18]发现冕环顶部的高度$1.1R_{\odot}$处亮度与磁场强度相关性最高, 证实了日冕绿线亮度与磁场强度之间的密切关系. 日冕磁场在太阳活动中起着重要作用, 基于日冕绿线的测量, 进一步深入探讨日冕绿线与磁场强度的相关性, 能为日冕磁场测量寻找观测证据. 日冕绿线5303 Å与EUV波段中211 Å强度相关性最高[18], 且日冕形态相似, 未来也可以利用不同波段对日冕深入研究, 有望精确跟踪在5303 Å观测到的出现在日面边缘的日冕结构, 为研究日冕在不同高度上发生的物理过程进行多波段联合分析. 接下来我们还将针对不同太阳活动周和日冕纬度分布来继续深入开展本项研究.

参 考 文 献

[1] 章振大. 日冕物理. 北京: 科学出版社, 2000: 23-25
[2] Lyot, B. MNRAS, 1939, 99: 580
[3] Young C A. Nature, 1870, 1: 532
[4] Mogilevsky E, Ioshpa B, Obridko V. SoPh, 1973, 33: 169

[5] Rybanský M, Rušin V, Minarovjech M. SSRv, 2001, 95: 227
[6] Rybanský M, Rušin V, Minarovjech M, et al. JGR, 2005, 110: A08106
[7] Sakurai T, Ichimoto K, Raju K P, et al. SoPh, 2002, 209: 265
[8] Shen Y D, Liu Y. ApJ, 2012, 754: 7
[9] Tian H, McIntosh S W, Wang T, et al. ApJ, 2012, 759: 144
[10] Peres G, Serio S, Vaiana G S, et al. ApJ, 1982, 252: 791
[11] Vaiana G S, Krieger A S, Timothy A F. SoPh, 1973, 32: 81
[12] Reale F. LRCA, 2014, 11: 4
[13] Aschwanden M J. Pour La Science, 2005, 35: 55
[14] Aschwanden M J, Poland A I, Rabin D M. ARA&A, 2001, 39: 175
[15] Poletto G, Vaiana G S, Zombeck M V, et al. SoPh, 1975, 44: 83
[16] Habbal S R, Druckmüller M, Morgan H, et al. ApJ, 2010, 708: 1650
[17] Wang Y M, Sheeley N R Jr, Hawley S H, et al. ApJ, 1997, 485: 419
[18] Zhang X F, Liu Y, Zhao M Y, et al. RAA, 2022, 22: 075007
[19] Makarov V I, Tlatov A G, Callebaut D K. International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium. Slovakia: ESA Press, 2003, 535: 217
[20] Liu Y, Shen Y D. Sci. China, Ser. G, 2009, 52: 1696
[21] Liu Y, Lin H S. ApJ, 2008, 680: 1496
[22] Mancuso S, Lee T S, Taricco C, et al. Proceedings of the International Astronomical Union, 2018, 13: 57
[23] Guhathakurta M, Fisher R R, Altrock R C. ApJ, 1993, 414: L145
[24] Guhathakurta M, Rottman G J, Fisher R R, et al. ApJ, 1992, 388: 633
[25] Smartt R N, Zhang Z, Smutko M F. SoPh, 1993, 148: 139
[26] Liu Y, Zhang X F. Proceedings of the International Astronomical Union, 2018, 13: 169
[27] Badalyan O G, Obridko V N. SoPh, 2006, 238: 271
[28] Koutchmy S, Contesse L, Viladrich C, et al. Proceedings of the 11th European Solar Physics Meeting. Leuven: CDROM Press, 2005, 26: 596
[29] Zhang X F, Liu Y, Zhao M Y, et al. RAA, 2022, 22: 075012
[30] Badalyan O G, Obridko V N, Sýkora J. SoPh, 2001, 199: 421
[31] Sykora J. AdSpR, 1994, 14: 73
[32] Sakurai T, Suematsu Y. AdSpR, 2002, 29: 1565
[33] Sakurai T, Rušin V, Minarovjech M. AdSpR, 2004, 34: 297
[34] Gnevyshev M N, Nikolsky G M, Sazanov A A. SoPh, 1967, 2: 223
[35] Zhao M Y, Liu Y, Elmhamdi A, et al. MNRAS, 2014, 443: 1955
[36] Zhao M Y, Liu Y, Elmhamdi A, et al. SoPh, 2018, 293: 1
[37] 刘煜. 天文爱好者, 2014, 1: 4
[38] Kiyoshi I, Motokazu N, Nobuyuki T, et al. PASJ, 1999, 51: 383
[39] Sakurai T. Sixty Years of Norikura Solar Observatory. Hinode-3: the 3rd Hinode Science Meeting, Tokyo, December 1-4, 2012
[40] Rušin V. BAICz, 1973, 24: 121

Study of the Intensity Distribution of the Green Line in the Inner Corona

LI Zi-han[1,2] LIU Yu[1,2,3] ZHANG Xue-fei[2] LIANG Hong-fei[1] SHA Fei-yang[2] YU Jin[4] DUN Jin-ping[5]

(1 School of Physics and Electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500)
(2 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)
(3 School of Physical Sciences and Technology, South West Jiao Tong University, Chengdu 611756)
(4 China Huayun Meteorological Technology Group Company Limited, Beijing 100081)
(5 China Meteorological Administration Space Weather Key Open Laboratory/National Satellite Meteorological Center (National Space Weather Monitoring and Early Warning Center); Xu Jianmin Meteorological Satellite Innovation Center, Beijing 100081)

Abstract The corona is a key region of solar atmospheric activity, and the source of solar-terrestrial space weather. Limited by observation, research on the plasma structure and magnetic field state of the

lower coronal atmosphere is still very lacking, and there are few international studies on the brightness stratification of the lower coronal atmosphere in the visible light band.In this paper, the coronal green line (Fe_{XIV}5303 Å) observation data of Lijiang coronagraph YOGIS (Yunnan Green-line Imaging System) is used to analyze the bright structure and mid-coronal loops in the inner coronal region ($1.03R_{\odot}$–$1.25R_{\odot}$) effectively. By fitting the exponential decay of the intensity of the bright structures at the radial height of the sun, comparing these fitting results, it is found that the decay index of the static inner coronal loops obtained is around a fixed value. Then, the more obvious coronal loops are extracted, and by performing the same exponential fitting on the intensities of different heights, the obtained decay index is also relatively similar to that of the bright structure, which provides a reference for further study of the evolution of physical parameters in the corona.

Key words Sun: corona, coronagraph: observation, coronal forbidden line: coronal green line